第 37 卷第 20 期
2017 年 10 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.20
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607291556
刘秀梅, 毕思圣, 张新宇, 朱红, 辛显彬, 马风云, 王华田, 仲凤维.磁化微咸水灌溉对欧美杨 I-107 微量元素和碳氮磷养分特征的影响.生态学报,2017,37(20):6691- 6699.
Liu X M, Bi S S, Zhang X Y, Zhu H, Xin X B, Ma F Y, Wang H T, Zhong F W.Effects of magnetized brackish water on the absorption and distribution of microelements, carbon, nitrogen and phosphorus in *Populus× euramericana* 'Neva'.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6691- 6699.

磁化微咸水灌溉对欧美杨 I-107 微量元素和碳氮磷养分特征的影响

刘秀梅[1,2], 毕思圣[1,2], 张新宇[1,2], 朱　红[1,2], 辛显彬[1,2], 马风云[1,2], 王华田[1,2,*], 仲凤维[3]

1 山东农业大学林学院, 泰安　271018
2 山东省高校森林培育重点实验室, 泰安　271018
3 泰安市泰山林业科学研究院, 泰安　271000

摘要:为探讨盐分环境下,磁化作用对土壤和植株养分特征的影响,以欧美杨 I-107 为试材,采用磁化和非磁化微咸水灌溉处理,通过对土壤和植物组织中微量元素和碳氮磷含量的测定,以揭示土壤-植物的养分供求关系。研究发现:(1)微咸水灌溉处理中叶片和根系 Fe 含量均下降;叶片 Zn、Mn 和 Cu 含量提高,根系 Mn 和 Zn 含量降低、Cu 含量提高。叶片和根系中总碳含量均提高,全氮和全磷含量均降低;叶片 C/N 下降,根系 C/N 和 C/P 则提高。(2)磁化微咸水灌溉处理叶片和根系中 Fe、Zn、Cu 含量均提高,Mn 含量降低;叶片 C、P 及 C/N 提高,N 含量下降;根系 C、C/N 和 C/P 含量提高。(3)微咸水灌溉土壤中 Fe、Mn、Zn 和 Cu 微量元素全量均降低,有效态含量均提高;OC 和 N、C/P 和 N/P 下降,全磷和 C/N 提高。(4)磁化微咸水灌溉中土壤 Fe、Mn 和 Zn 全量提高,Cu 降低; Fe、Mn、Zn 和 Cu 有效态含量提高;OC 和 N、C/P 和 N/P 提高。可见,磁化作用有利于调节植株对微量元素的吸收和分配,提高土壤的固氮能力以及对植株的碳供应能力。此外,盐分环境下,植物体通过提高元素 Fe 含量以及 C/N 比值维持光合作用的正常进行,以满足植株正常生长发育的需要。

关键词:磁化作用; 微咸水; 微量元素; 碳氮磷; 生态化学计量

Effects of magnetized brackish water on the absorption and distribution of microelements, carbon, nitrogen and phosphorus in *Populus× euramericana* 'Neva'

LIU Xiumei[1,2], BI Sisheng[1,2], ZHANG Xinyu[1,2], ZHU Hong[1,2], XIN Xianbin[1,2], MA Fengyun[1,2], WANG Huatian[1,2,*], ZHONG Fengwei[3]

1 *College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
2 *Key Laboratory of Silviculture in Universities of Shandong (Shandong Agricultural University), Tai'an* 271018, *China*
3 *Taishan Research Institute of Forestry Science, Tai'an* 271000, *China*

Abstract: Soil salinity can affect the absorption and transportation of mineral nutrition of plants, and the nutritional retaining of the soil. To investigate the nutritional supply-demand relationship between soil and plants under soil salinity conditions, we performed irrigation experiments using one-year old of *Populus× euramericana* 'Neva' seedlings, and the contents of microelements, carbon, nitrogen and phosphorus and ecological stoichiometry were analyzed. The results showed

基金项目:国家引进国际先进林业科学技术计划(2011-4-60);山东省农业重大应用技术创新资助项目(鲁财农指〔2016〕36 号)
收稿日期:2016-07-29;　　**网络出版日期**:2017-06-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wanght@ sdau.edu.cn

that: (1) Under non-magnetized brackish water (NMBW) irrigation, the Fe content in both leaves and roots was decreased, whereas the Cu content was increased, and the Zn and Mn contents were increased in leaves and decreased in roots. The total carbon content of leaves and roots was promoted by NMBW irrigation, whereas the total nitrogen and phosphorus contents were reduced; the C/N ratio decreased in leaves was decreased, while the C/N and C/P ratios were elevated in roots. (2) Under magnetized brackish water (MBW) irrigation, the contents of Fe, Zn and Cu were improved in both leaves and roots, and Mn contents was decreased. The total carbon and phosphorus contents and C/N ratio of leaves were increased, while the N content was decreased; and the total carbon content, and C/N and C/P ratios of roots were promoted. (3) Under NMBW irrigation, the Fe, Mn, Zn and Cu contents of the soil were decreased, whereas the content of available microelements were increased; and the organic carbon and total nitrogen contents, and the C/P and N/P ratios were decreased, but the total phosphorus content and the C/N ratio were increased. (4) The total content of Fe, Mn and Zn of the soil were improved by MBW irrigation, as were the available content of Fe, Mn, Zn and Cu, whereas the total Cu content decreased. The organic carbon and total nitrogen contents, and the C/P and N/P ratios in soil were all increased. Therefore, the magnetization improved the absorption and distribution of microelements in plants and could also improve the N sequestration capacity of soil and the C supply of plants. Moreover, the magnetization could increase the Fe content and C/N ratio of plants under salinity conditions, which could maintain normal photosynthesis rates and improve plant growth and development under salt-stress.

Key Words: magnetization; brackish water; microelements; carbon; nitrogen; phosphorus; ecological stoichiometry

植物和土壤是生态系统中主要的营养物质储存库,营养元素的含量特征因土壤类型和植物种类而异,同时在一定程度上受外界环境因素影响。土壤养分含量及其有效性是生态系统中重要的化学指标,影响着植物的生长和发育,二者相互作用,构成一个整体。

微量元素是植物体内各种酶、生长激素及维生素等的关键组分,在植物生长发育过程中起重要作用[1]。参与植物体内各种生理代谢活动所需的 Fe、Mn、Zn、Cu 等微量元素主要来源于土壤,土壤中微量元素的供应水平会影响植物的代谢功能[2-3]。碳氮磷是植物生命活动过程中的基础元素,是生命体实现能量代谢、遗传变异和信息表达的重要部分[4]。碳为构成植物体的结构性物质,氮磷为功能性物质[5],三者是植物必需的营养元素和生长限制元素,在植物生长发育过程中起重要作用[6],其化学计量比则是判断土壤对植物生长过程中养分供应的重要指标[7-8]。因此,研究植物和土壤之间不同种类的矿质养分,探讨土壤生态化学循环过程中养分的迁移规律和植物体养分限制情况,对揭示植物对盐分生境的适应机制具有重要意义。

随着经济的快速发展,淡水资源供需矛盾日益严重,合理开发地下微咸水资源逐渐成为各国关注的热点[9]。目前,国内外诸多学者对微咸水的灌溉方法与技术、土壤盐分对土壤质量和作物产量及品质的影响等内容进行了研究,并取得了一定的研究成果,这为微咸水的利用提供了理论基础[10]。微咸水的利用虽然满足了作物不同时期的需水要求,但过量微咸水灌溉会引起土壤生态环境恶化、降低作物产量和品质。为避免长期微咸水灌溉造成的土壤盐渍化,有必要研究微咸水的相关处理技术,以降低灌溉后对土壤环境、植物生长发育等造成的不利影响。

磁化水处理技术作为一种农业新型灌溉技术,具有简便、高效及低投入等特点。液态水在以一定流速经过磁场后,水分子与离子的水合作用增强,溶解度提高,土壤离子交换能力和离子饱和度提高,可以在一定程度上避免长期微咸水灌溉导致的 Na^+过量积累。研究发现,磁化水灌溉可以提高种子中微量元素和碳氮硫等养分的含量[11]、提高土壤脱盐率[12]及节约灌溉用水量[13-14]、提高水分利用效率[15],且与普通水相比,磁化水灌溉后土壤疏松、不板结。

本文以欧美杨 I-107(*Populus× euramericana* 'Neva')为试材,通过对植物组织和土壤中微量元素及碳氮磷养分含量测定,分析植物体对各营养元素的吸收和利用及土壤对养分的固持状况,以期阐明磁化微咸水灌

溉对土壤-植物养分运输和循环的作用机理,为微咸水的开发利用及磁化水处理技术的应用提供理论基础。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验材料为当年生欧美杨 I-107(*Populus×euramericana* 'Neva'),插穗直径(1.52±0.11) cm、长度 12 cm。盆栽试验地点位于山东农业大学试验站内(117°08′E, 36°11′N)。供试土壤类型以壤质土为主,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.80、0.53、0.70 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 318.50、201.30、13.50 mg/kg,有机质含量 24.03 g/kg,pH 7.0。盆栽容器为直径 25 cm、高 20 cm 的陶土盆,每盆装入土壤 10 kg。扦插时间为 2014 年 3 月下旬,每盆 1 株,自来水灌溉,前期进行统一管理。

1.2　试验设计

模拟海水质量比 $NaCl:Na_2SO_4:CaCl_2:MgCl_2=4:2:2:1$,配制成浓度为 4.0 g/kg 的灌溉微咸水。磁化水处理器为 Magnetic Technologies L. L. C(阿联酋)的 U050(12.7 mm),其长度 160 mm,内径 21 mm,出水量 5 m^3/h。

试验共设 4 个处理:磁化微咸水灌溉处理(magnetized 4 g/L saline solution irrigation, M4)、非磁化微咸水灌溉处理(non-magnetized 4 g/L saline solution irrigation, NM4)、磁化淡水灌溉处理(magnetized 0 g/L saline solution irrigation, M0)及非磁化淡水灌溉处理(non-magnetized 0 g/L saline solution irrigation, NM0)。盆栽试验,重复 6 次。5 月初待扦插苗 30 cm 以上,按照试验设计分别进行 4 个不同处理的灌溉试验,每隔 5 d 饱和灌溉 1 次。

1.3　样品采集

于同年 8 月 10 日采集栽培容器中部根际土壤(10—15 cm),实验室风干去除残根及石砾,过 80 目筛后用于微量元素(microelements)和有机碳(OC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量及碳氮磷化学计量比(C/N, C/P, N/P)的测定分析。同时采集扦插苗中部成熟叶片和根系,经自来水和去离子水反复冲洗,105℃杀青后 80℃烘干至恒重,粉碎后过 60 目筛,用于微量元素和总碳(total carbon, TC)、全氮和全磷含量测定。

1.4　测定方法

(1)植物组织矿质元素含量测定　Fe、Mn、Zn、Cu 采用原子吸收分光光度法测定;总碳采用 $K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4氧化法;全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用钒钼黄比色法测定[16]。

(2)土壤矿质元素含量测定　Fe、Mn、Zn、Cu 全量(浓 H_2SO_4-H_2O_2消煮)和有效态含量(ASI 浸提法)采用原子吸收分光光度法测定;有机质采用 $K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4容量法;全氮采用凯氏定氮法;全磷采用钼蓝比色法;全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法;碱解氮采用碱解扩散法;有效磷采用 $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法[16]。

1.5　数据处理

采用 Excel 2013 和 SAS 9.0 进行数据处理,利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 新复极差法(Duncan′s multiple-range)进行差异显著性分析($P < 0.05$);各营养元素之间的相关性分析采用 SPSS 16.0。

2　结果与分析

2.1　磁化微咸水灌溉对植株微量元素的影响

从表 1 中看出,不同处理之间叶片组织中 Fe、Mn、Zn 和 Cu 4 种微量元素含量差异显著($P < 0.05$)。与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉处理(M4, NM4)Fe 含量降低,为 16.6%—19.3%;Zn、Mn 和 Cu 含量提高,分别为 6.7%—17.6%、51.8%—61.7%和 15.0%—29.8%,Zn 含量提高幅度最大。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉中 Fe、Zn 和 Cu 3 种元素含量提高,其中 M0 较 NM0 分别增加 72.8%、4.8%和 50.6%,M4 较 NM4 分别增加 78.5%、12.1%和 33.4%。

微咸水灌溉根系组织中 Fe、Mn、Zn 含量呈降低趋势,M4 较 M0 分别降低 3.9%、19.2%和 23.4%,NM4 较

NM0 分别降低 20.5%、36.9%和 25.2%,其中非磁化微咸水灌溉根系组织中 Fe、Mn、Zn 含量降低幅度大于磁化微咸水灌溉植株,磁化处理显著提高了根系组织中 Fe、Mn、Zn 的含量($P < 0.05$)。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉 Fe、Zn 和 Cu 含量提高,M0 较 NM0 分别提高 24.5%、6.7%和 4.0%,M4 较 NM4 分别提高 50.4%、9.3%和 1.8%;Mn 含量则降低,为 13.3%和 36.9%。

表 1 磁化微咸水灌溉条件下杨树叶片和根系组织中 Fe、Mn、Zn 和 Cu 四种微量元素含量

Table 1 The content of Fe, Mn, Zn and Cu in leaves and roots of *Populus× euramericana* 'Neva' under magnetized brackish water irrigation

处理 Treatment	叶片 Leaf				根系 Root			
	Fe(μg/g)	Mn(μg/g)	Zn(μg/g)	Cu(μg/g)	Fe(μg/g)	Mn(μg/g)	Zn(μg/g)	Cu(μg/g)
M0	65.79±1.11a	17.01±0.28b	12.02±0.31c	3.99±0.08b	927.05±12.89a	49.16±0.60b	15.70±0.59a	7.37±0.23a
NM0	38.07±2.66c	20.39±0.10ab	11.47±0.16c	2.65±0.29d	744.43±9.21b	55.69±0.35a	14.71±0.12a	7.09±0.22a
M4	54.84±0.80b	20.01±0.31c	19.44±0.27a	4.59±0.08a	890.62±16.99a	39.72±0.71c	12.03±0.14b	7.46±0.12a
NM4	30.73±0.97d	21.84±0.82a	17.34±0.45b	3.44±0.08c	592.13±9.73c	54.39±1.18a	11.01±0.25b	7.33±0.64a

M4:磁化微咸水灌溉 magnetized 4 g/L saline solution irrigation,NM4:非磁化微咸水灌溉处理 non-magnetized 4 g/L saline solution irrigation,M0:磁化淡水灌溉处理 magnetized 0 g/L saline solution irrigation,NM0:非磁化淡水灌溉处理 non-magnetized 0 g/L saline solution irrigation;表中数据为 3 次测定的平均值±标准误,同行中不同小写字母表示处理间的差异达到显著水平($P < 0.05$)

2.2 磁化微咸水灌溉对植株碳氮磷养分含量的影响

叶片组织中总碳、全氮和全磷含量(表 2)依次为:总碳>全氮>全磷。总碳含量最高,达 246.6—559.80mg/kg,较全氮和全磷含量分别高 472.2%和 207.7%。与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉处理叶片组织中总碳、全氮和全磷含量降低,其中总碳含量下降幅度最大,为 28.9%—39.7%;M4 较 M0 分别降低 39.7%、4.3%和 0.1%,NM4 较 NM0 分别降低 28.9%、8.1%和 25.9%;C/N 降低 21.7%—36.9%,而对 C/P 和 N/P 比值无显著影响。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉提高了总碳和全磷含量及 C/N 比值,其中 M0 较 NM0 分别提高 61.3%、65.5%和 90.0%,M4 较 NM4 分别提高 37.0%、123.2%和 53.1%。由此看出,磁化微咸水灌溉对叶片总碳有明显的提高作用;全氮则降低 10.5%—14.0%。

表 2 磁化微咸水灌溉条件下叶片和根系碳氮磷含量及生态化学计量比

Table 2 The content of total carbon, total nitrogen, total phosphorus and ecological stoichiometry in leaves and roots under magnetized brackish water irrigation

处理 Treatment	叶片 Leaf				根系 Root			
	M0	NM0	M4	NM4	M0	NM0	M4	NM4
总碳(TC) /(mg/kg) Total carbon	559.80±61.68a	347.00±18.03b	337.80±18.81b	246.60±19.80b	253.80±24.68c	189.80±20.76c	517.00±5.00a	424.80±38.78b
全氮(TN)/(mg/kg) Total nitrogen	65.15±0.99ab	75.79±2.09a	62.36±5.87b	69.68±4.10ab	100.10±5.64b	174.88±35.40a	86.24±4.31b	156.66±24.10ab
全磷(TP) /(mg/kg) Total phosphorus	287.01±16.82a	173.41±10.44b	286.75±41.18a	128.45±9.70b	59.34±12.84a	49.96±9.82b	40.40±3.63b	46.49±1.96b
C/N	8.59±1.09a	4.52±0.12b	5.42±0.67b	3.54±0.06b	2.54±0.31bc	1.09±0.42a	5.99±0.68a	2.71±0.65ab
C/P	1.95±0.84ab	2.00±0. 24a	1.18±0.13b	1.92±1.35ab	4.27±0.51c	3.80±0.12d	12.80±0.36a	9.14±0.17b
N/P	0.23±0.08ab	0.44±0.07b	0.22±0.21ab	0.54±0.13a	1.69±0.21c	3.50±0.08ab	2.13±0.04b	3.37±0.16a

根系组织中,与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉中总碳含量升高为 103.7%—123.8%,C/N 和 C/P 比值提高,M4 较 M0 分别增加 135.8%和 201.4%,NM4 较 NM0 分别提高 148.6%和 140.5%,但对 N/P 没有明显影响,由此看出,微咸水灌溉条件下,促进了碳在根系中的积累;全氮和全磷含量则降低,M4 较 M0 降低 13.6%和 31.9%,NM4 较 NM0 降低 10.4%和 6.95%。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉中,总碳含量、C/N 和 C/P 比值提高,其中 M0 较 NM0 分别提高 33.7%、133.0%和 12.4%,M4 较 NM4 分别提高 21.7%、121.0%和 40.0%;全氮含量和 N/P 比值降低,M0 较 NM0 分别降低 42.8%和 45.0%,M4 较 NM4 分别降低 51.7%和 36.8%;对全磷含量没有显著影响。

叶片和根系组织中,与叶片相比,根系中总碳、全氮、C/P 和 N/P 比值略高于叶片,且磁化微咸水灌溉植株高于非磁化微咸水灌溉植株;全磷及 C/N 比值则略低,但磁化微咸水灌溉植株中全磷和 C/N 高于非磁化微咸水灌溉的植株。可见,磁化作用下植株叶片和根系组织中富碳能力提高。

2.3　磁化微咸水灌溉对土壤微量元素全量和有效态含量的影响

土壤微量元素全量的测定分析发现,与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉土壤中 Fe、Mn 和 Zn 全量降低,其中 M4 较 M0 降低 6.1%、13.8%和 9.5%,NM4 较 NM0 降低 21.9%、7.2%和 23.8%;Cu 全量提高,分别为 11.0%和 19.6%,且各处理间呈显著差异水平($P < 0.05$);与非磁化微咸水灌溉相比(NM0, NM4),磁化微咸水灌溉土壤中 Fe、Mn 和 Zn 含量提高,其中 M0 较 NM0 分别增加 22.4%、28.3%和 25.5%,M4 较 NM4 分别提高 47.0%、19.2%和 49.1%,Cu 全量则降低,分别为 0.7%和 8.1%,且各处理间总体呈显著差异水平($P < 0.05$)。

土壤微量元素有效态含量的测定分析发现,与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉土壤中 Fe、Mn 和 Zn 含量提高,其中 M4 较 M0 分别提高 49.7%、12.4%和 18.9%,NM4 较 NM0 分别提高 3.6%、8.2%和 8.6%,Cu 有效态含量则降低,分别为 12.6%和 5.0%,且各处理间总体呈显著差异水平($P < 0.05$);与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉土壤中有效态 Fe、Mn、Zn 和 Cu 含量均降低,M0 较 NM0 分别降低 43.3%、43.1%、20.0%和 16.8%,M4 较 NM4 分别降低 18.1%、40.9%、12.4%和 23.4%。

表 3　磁化微咸水灌溉对土壤微量元素全量含量和有效态含量的影响

Table 3　The content of complete and available microelements of Fe, Mn, Zn and Cu under magnetized brackish water irrigation

处理 Treatment	微量元素全量 Complete Microelements				微量元素有效态含量 Available Microelements			
	Fe/(μg/g)	Mn/(μg/g)	Zn/(μg/g)	Cu/(μg/g)	Fe/(μg/g)	Mn/(μg/g)	Zn/(μg/g)	Cu/(μg/g)
M0	2261.02±28.87a	270.33±2.78a	70.07±0.41a	18.96±0.38c	8.27±0.09d	7.02±0.04d	1.96±0.03c	1.83±0.02c
NM0	1846.98±7.72c	210.67±0.43c	55.82±00.62c	19.10±0.66c	14.59±0.09b	12.34±0.09b	2.45±0.01b	2.20±0.01a
M4	2122.16±11.02b	232.98±1.96b	63.39±0.35b	20.99±0.22b	12.38±0.13c	7.89±0.03c	2.33±0.02b	1.60±0.01d
NM4	1443.27±16.95d	195.42±2.61d	42.53±0.32d	22.85±0.31a	15.12±0.9a	13.35±0.03a	2.66±0.07a	2.09±0.03b

2.4　磁化微咸水灌溉对土壤碳氮磷养分特征的影响

碳氮磷是土壤养分的重要组成部分,是影响土壤养分循环和生态系统健康的重要因子,其含量多少,会影响土壤微生物活动、凋落物分解速率和有机碳的累积。通过对有机碳、全氮、全磷的测定发现(表 4),3 种营养元素在土壤中的含量大小依次为有机碳>全氮>全磷,与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉中土壤有机碳和全氮含量降低,其中 M4 较 M0 降低 4.9%和 31.9%,NM4 较 NM0 降低 24.3%和 28.1%;全磷提高 22.4%和 38.0%。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉土壤中有机碳和全氮含量提高,其中 M0 较 NM0 提高 15.9%和 61.8%,M4 较 NM4 提高 45.7%和 53.1%;全磷降低,为 25.0%和 19.9%。

表 4　磁化微咸水灌溉土壤有机碳、全氮和全磷含量及生态化学计量比

Table 4　The content of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and ecological stoichiometry in soil under magnetized saline water irrigation

处理 Treatment	有机碳(OC) Organic carbon/(mg/kg)	全氮(TN) Total nitrogen/(mg/kg)	全磷(TP) Total phosphorus/(mg/kg)	有机碳/全氮(C/N) Organic carbon and total phosphorus ratio	有机碳/全磷(C/P) Organic carbon and total phosphorus ratio	全氮/全磷(N/P) Organic carbon and total phosphorus ratio
M0	5570.99±59.18a	3108.34±41.73a	93.00±0.21d	1.79±0.03b	60.01±1.79a	33.49±1.14a
NM0	4807.02±132.59c	1921.30±20.12c	124.00±0.11b	2.50±0.07a	38.80±1.39c	15.50±1.33c
M4	5299.67±13.96b	2117.09±26.85b	113.80±0.14c	2.47±0.03a	45.96±1.11b	18.60±1.16b
NM4	3638.21±128.88d	1382.47±5.35d	142.00±0.10a	2.63±0.10a	25.62±1.65d	9.74±0.94d

碳氮磷化学计量比(C/N/P)是土壤中碳素、氮素与磷素之间总质量的比值,也是土壤生态计量学中的重要指标。与对照相比(M0, NM0),微咸水灌溉土壤中 C/P 和 N/P 比值下降,其中 M4 较 M0 降低 23.4%和 44.5%,NM4 较 NM0 降低 34.0%和 37.2%;C/N 提高 4.5%和 5.2%, N/P 下降幅度最大 37.2%—44.5%。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉土壤中 C/P 和 N/P 比值提高,M0 较 NM0 提高 54.7%和 116.1%,M4 较 NM4 提高 79.4%和 91.0%,磁化微咸水灌溉土壤中 N/P 提高幅度最大为 91.0%—116.1%;C/N 降低分别为 28.4%和 6.1%。

3 结论与讨论

3.1 磁化微咸水灌溉影响植物养分特征和碳氮磷化学计量

叶片和根系组织中,磁化微咸水灌溉后植株 Fe、Zn 和 Cu 含量均高于非磁化微咸水灌溉植株,与王俊花等[17]对黄瓜、Harsharn 等[18]对雪豆和鹰嘴豆中微量元素含量的研究结果相似,这是由于植株体内长期磁场效应作用于养分的迁移所致。磁场的存在会使某些激素含量增加,如 Turker 等[19]发现,磁场作用下提高了向日葵中赤霉素、吲哚乙酸、玉米素的含量,这可以刺激植物增强对营养元素的吸收。铁在植物体内的运输一般是通过木质部,且与质外体 pH 大小相关,叶片中 Fe 含量降低,说明铁由根系向叶片的运输能力较弱,这与韩振海等[20]对高 pH 抑制铁吸收和运输的研究结果一致,主要因为位于质膜上的铁还原酶活性受质外体 pH 调控;根系和叶片 Fe 含量提高,叶片颜色较深,这是由于磁化作用可以通过质外体 pH 的调节影响铁的跨膜运输和质外体中铁的活化,使被活化的铁一部分通过跨原生质膜运输至叶片参与叶绿素合成,另一部分释放到介质中[21]。元素 Zn 在叶片中累积量较高,这说明盐分环境下受磁化作用影响,植株根部对 Zn 吸收能力较强、根部到叶片的传输能力较快,叶片对 Zn 的解毒和储存能力增强[22]。Cu 含量的多少对氮代谢、蛋白合成及光合作用产生影响,磁化作用维持了相对较高水平的 Cu,这不仅可以增强蛋白的活性,还可以维持光合作用的正常进行。

氮和磷是构成各种蛋白质和遗传物质的重要元素,光合作用同化的碳是植物生理生化过程中的底物和能量的来源[23],其分配特征在养分循环过程中占据重要地位。微咸水灌溉后,叶片和根系中 C 含量最高但低于对照水平,这表示盐分环境下,植株可以维持一定水平的 C 含量;叶片中 P 含量次之、N 含量最少,即叶片中 P 累积量增加,而 N 富集量则降低,这与任书杰等[24]的研究结果略有差异;叶片中 N 含量的多少可以直接决定植物光合能力的强弱,N 含量下降则说明光合能力降低。根系 N 含量低于 C 含量、P 含量最低,这是由于土壤中大量可溶性 P 随盐分淋溶,导致耕层中 P 含量降低,同时盐分离子的摄入,会影响有效态氮的含量水平以及植物对有效态氮的直接吸收利用。与非磁化微咸水灌溉相比,磁化微咸水灌溉后,叶片和根系均维持了相对较高水平的总碳和全磷含量,且叶片中累积量高于根系;全氮含量降低,且叶片中累积量低于根系;这说明磁化作用改变了植物碳氮磷三种营养元素的分布格局,并有利于 C、P 在植株体内的富集。

C/N 和 C/P 表示植物的生长速度与 N、P 利用效率之间的相关性,N/P 比值反映植物生长受 N 或者 P 的限制情况[6,25]。磁化作用下,叶片中 C/N 比值提高、C/P 和 N/P 比值下降,根系中 C/N 和 C/P 比值提高、N/P 比值下降,另外,叶片和根系中 C/N 比值较非磁化灌溉中提高,且根系低于叶片,这说明根系是光合产物的暂时储存和运输器官,适度较低的 C/N 比值则表示光合产物向外运输的高效性;N/P 较低,维持在 0.23—3.37,加之较低的 N 含量,说明在盐分环境下,植株受 N、P 共同作用的同时更容易受 N 的影响,这与张珂等[26]的研究结果相似。相关性分析结果表明,根系中 N 含量均与叶片和根系中 C、N、P 含量呈负相关,这体现了叶片-根系间养分吸收和分配的经济策略[27]。

植物微量元素与碳氮磷之间存在一定的相关性。研究发现,叶片和根系中 C 与 Fe 的相关系数最高。Fe 在植物细胞呼吸、光合作用以及金属蛋白的催化反应等生理过程中发挥着重要作用,是关键的电子传递体,在植物生命活动中是不可或缺的[28];Fe 是叶绿体的主要构成元素,叶绿体是进行光合作用的重要场所,植物对光能的吸收、传递和转化均是通过叶绿体上的类囊体膜实现的,是利用光能将 CO_2转化为碳水化合物,释放能

量的过程,而 CO_2 的同化循环过程的部位则是叶绿体基质。因此,元素 Fe 的吸收和分配对调节碳循环来改善植物的光合效率具有重要意义。研究发现,Mn 和 Zn 的吸收和转运与 N 的吸收和分配呈负相关,这说明 N 与 Mn、Zn 之间存在拮抗作用,即随着 Mn 和 Zn 在叶片和根系中的富集,降低了对 N 的积累,对于其作用机理有待进一步研究。

3.2　磁化微咸水灌溉促进全量养分的积累和有效态养分的利用

土壤养分全量在一定程度上代表着土壤养分的源与库以及某种养分的潜在供应水平,有效态养分则是反映养分被植物吸收利用的有效性,二者综合反映土壤养分状况。研究发现,微咸水灌溉后土壤微量元素全量较对照相比降低,微量元素有效态含量提高;磁化微咸水灌溉较非磁化微咸水灌溉维持了相对较高水平的全量养分和较低水平的有效态养分,对植物体内养分含量的测定发现,磁化微咸水灌溉提高了微量元素积累量。这说明,磁化作用下土壤在维持相对较高水平微量元素全量的同时,又促进了植物体对有效态养分的吸收和利用。

植株体内和土壤中,元素 Fe 含量最高,元素 Cu 含量最低,Kopittke 等[29]发现,土壤中有效态元素 Cu 与植物的生理特性密切相关,含量过高会阻碍植物生长,长期盐分环境植物可通过沉淀、络合、降解等调节作用降低对 Cu 的吸收利用。因此,Cu 含量降低而 Fe 含量升高是植物对环境的一种积极适应方式,同时也说明磁化作用对土壤微量元素的改善状况是一个长期而缓慢的过程。

3.3　磁化微咸水灌溉对碳氮磷养分特征的影响

有机碳是土壤不可或缺的肥力指标,参与全球碳循环,其在土壤剖面中的垂直分布格局的差异是影响土壤碳动态的重要因素,也是土壤碳循环的重要研究内容。研究发现,土壤有机碳含量高于氮磷,且磁化微咸水灌溉维持了相对较高水平的有机碳含量,说明磁化作用有利于提高土壤有机质的数量和腐殖化系数,改善土壤结构、提高土壤的固碳能力。土壤氮和磷是重要的营养元素,可直接反映生态系统中土壤的营养状况。土壤氮含量是氮素矿化与积累平衡的结果[30],有机质含量对氮的贡献率最大,二者密切相关[31],有机质在微生物作用下对矿质碳的分解释放,是作物可直接利用的土壤中有效氮的主要来源,也是影响土壤氮素矿化过程的主要因素[32]。研究发现,土壤氮磷含量低于有机碳含量,磁化微咸水灌溉维持了相对较高水平的氮含量和较低水平的磷含量,说明磁化作用可以影响氮的矿化,并维持一定水平的有效氮供应;土壤中磷含量降低,但植物体内磷含量提高,表示磁化作用有利于有效化磷由土壤固相向土壤液相的释放,水溶态磷含量及矿质元素迁移速率提高,加速了植物体对磷的吸收利用。相关性分析表明二者与有机碳呈负相关关系,这表示土壤本身对碳氮磷的固定具有一定的调节作用。

土壤碳氮磷比值是有机质或其他成分中碳素、氮素与磷素的比值,是衡量土壤有机质组成和土壤质量的重要指标之一。C/N 与土壤有机质的分解速率呈负相关,C/N 较低则矿化作用较强,反之则较弱;C/P 的降低则有利于土壤中微生物的活动以及对有机质的分解和养分的释放,同时对有效态磷有一定的提高作用。磁化微咸水灌溉中,土壤有机碳含量提高,C/N 则降低,说明盐渍化生境中,磁化作用在促进有机质、有机氮分解和矿化的同时,也提高了土壤固定有机碳的能力。磁化微咸水灌溉中 C/N 比值降低,则表示氮超过微生物生长所需要的部分可以释放到凋落物或土壤中,有机质 C/N 比值与其分解速度成反比[34],说明盐分环境下,受磁化作用影响有机质的分解速度减缓,这不仅可以维持土壤微生物在生命活动过程中所需的碳素,也保证了微生物构成自己身体所需的碳素来源[35],同时增强了土壤的固碳能力和氮的循环。微咸水灌溉中 C/P 和 N/P 比值降低,研究发现 P 属空间变异性较小且易沉积的元素,变化较稳定[36],其含量水平在 90—140 mg/kg,低于我国土壤含磷量的平均水平(0.56 g/kg),这说明盐渍化土壤中表现为磷缺乏现象;磁化作用下,土壤维持了相对较高水平 C/P 和 N/P 比值,这可以在一定程度上补充盐分环境下氮素的不足,增强磷素的迁移速率,维持植株对氮磷的吸收。

参考文献(References):

[1] Alvarenga I C A, Boldrin P F, Pacheco F V, Silva S T, Bertolucci S K V, Pinto J E B P. Effects on growth, essential oil content and composition

of the volatile fraction of *Achillea millefolium* L. cultivated in hydroponic systems deficient in macro- and microelements. Scientia Horticulturae, 2015, 197: 329-338.

[2] Wang S Y, Yu T Q, Wang J L, Yang L, Yang K, Lu P. Preliminary study on spatial variability and distribution of soil available microelements in Pinggu County, Beijing, China. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(10): 1235-1244.

[3] Rengel Z. Cycling of micronutrients in terrestrial eco-systems// Marschner P, Rengel Z, Eds. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems. Berlin: Springer, 2007: 93-121.

[4] Zeng W J, Wang W. Combination of nitrogen and phosphorus fertilization enhance ecosystem carbon sequestration in a nitrogen-limited temperate plantation of Northern China. Forest Ecology and Management, 2015, 341: 59-66.

[5] 董晓玉, 傅华, 李旭东, 牛得草, 郭丁, 李晓东. 放牧与围封对黄土高原典型草原植物生物量及其碳氮磷贮量的影响. 草业学报, 2010, 19(2):175-182.

[6] Ren C J, Zhao F Z, Kang D, Yang G H, Han X H, Tong X G, Feng Y Z, Ren G X. Linkages of C:N:P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland. Forest Ecology and Management, 2016, 376: 659-66.

[7] Deng J, Sun P S, Zhao F Z, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil C, N, P and its stratification ratio affected by artificial vegetation in subsoil, Loess Plateau China. PloS One, 2016, 11 (3): e0151446.

[8] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, Peñuelas J, Richter A, Sardans J, Wanek W. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations. Ecological Monographs, 2015, 85(2): 133-155.

[9] Carol E, García L, Borzi G. Hydrogeochemistry and sustainability of freshwater lenses in the Samborombón Bay wetland, Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 2015, 60: 21-30.

[10] Ahmed B A O, Inoue M, Moritani S.Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat.Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 165-170.

[11] Hozayn M, Mohamed S A Q A. Magnetic water application for improving wheat (*Triticum aestivum* L.) crop production. Agriculture & Biology Journal of North America, 2010, 1(4): 677-682.

[12] Constable S. Marine electromagnetic methods-a new tool for offshore exploration. The Leading Edge, 2006, 25(4): 438-444.

[13] Khoshravesh M, Mostafazadeh-Fard B, Mousavi S F, Kiani A R. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. Soil Use and Management, 2011, 27(4): 515-522.

[14] Mostafazadeh-Fard B, Khoshravesh M, Mousavi S F, Kiani A R. Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution in trickle irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, American Society of Civil Engineering, 2011, 137(6): 398-402.

[15] Maheshwari B L, Grewal H S. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. Agricultural Water Management, 2009, 96(8): 1229-1236.

[16] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术. 北京:化学工业出版社, 2007.

[17] 王俊花, 樊敬前, 邵林生, 王瑞刚, 白玉林, 郭瑞萍, 闫建宾. 磁化水对黄瓜叶片微量元素含量的影响. 中国农学通报, 2006, 22(7): 290-293.

[18] Grewal H S, Maheshwari B L. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. Bioelectromagnetics, 2011, 32(1): 58-65.

[19] Turker M, Temirci C, Battal P, Erez M E. The effects of an artificial and static magnetic field on plant growth, chlorophyll and phytohormone levels in maize and sunflower plants. Phyton- Annales Rei Botanicae, 2007, 46: 271-284.

[20] 韩振海, 许雪峰. 不同铁效率果树基因型研究的现状和前景[J]. 园艺学年评. 北京:科学技术出版社, 1995: 1-16.

[21] Briat J F, Dubos C, Gaymard F. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. Trends in Plant Science, 2015, 20(1): 33-40.

[22] Tang L, Yao A J, Yuan M, Tang Y T, Liu J, Liu X, Qiu R L. Transcriptional up-regulation of genes involved in photosynthesis of the Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii* in response to zinc and cadmium. Chemosphere, 2016, 164: 190-200.

[23] 杨慧敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的影响研究进展. 草业学报, 2011, 20(2): 244-252.

[24] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.

[25] Khan K S, Mack R, Castillo X, Kaiser M, Joergensen R G. Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios. Geoderma, 2016, 271: 115-123.

[26] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.

[27] Sterner R W, Elser J J, Vitousek P. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002: 87-104.

[28] Colangelo E P, Guerinot M L. Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9(3): 322-330.

[29] Kopittke P M, Menzies N W. Effect of Mn deficiency and legume inoculation on rhizosphere pH in highly alkaline soils. Plant and Soil, 2004, 262(1/2): 13-21.

[30] Jian S Y, Li J W, Chen J, Wang G S, Mayes M A, Dzantor K E, Hui D F, Luo Y Q. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 32-43.

[31] Koikkalainen R K, Dawson L A, Mayes R W, Smith J U. Effect of plant species, nitrogen fertilizer and grass age on the dynamics of intra-aggregate SOM. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 1104-1107.

[32] Antisari L V, Marinari S, Dell'Abate M T, Baffi C, Vianello G. Plant cover and epipedon SOM stability as factors affecting brown soil profile development and microbial activity. Geoderma, 2011(3/4), 161: 212-224.

[33] Zhang L, Sun X Y, Tian Y, Gong X Q. Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*. Scientia Horticulturae, 2014, 176: 70-78.

[34] Sorrenti G, Toselli M, Marangoni B. Use of compost to manage Fe nutrition of pear trees grown in calcareous soil. Scientia Horticulturae, 2012, 136: 87-94.

[35] Don A, Rödenbeck C, Gleixner G, Unexpected control of soil carbon turnover by soil carbon concentration. Environmental Chemistry Letters, 2013, 11(4): 407-413.

[36] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳"盐岛"和"肥岛"效应及其碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 653-658.